

15. ISO/TS 19139:2007. Geographic information – Metadata – XML schema implementation.

16. Geographic information – Reference model. – http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?ics1=35&ics2=240&ics3=70&csnumber=26002.

17. Geonetwork opensource. The complete manual. V 2.4. – 2009. – <http://geonetwork-opensource.org/>.

18. 9101:2002 Geographic information – Reference model.

19. Федеральный закон № 33-ФЗ «Об особо охраняемых природных территориях» от 14 марта 1995 г (по состоянию на 01.01.2010) [HTML].

20. INSPIRE Data Specification on Protected sites – Guidelines v 3.1.0 03.05.2010 [PDF]. – http://inspire.jrc.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/INSPIRE_DataSpecification_PS_v3.1.pdf.

Е.Б. Кудашев

Институт космических исследований РАН (Москва)

Московский государственный университет

им. М.В. Ломоносова, kudashev@iki.rssi.ru

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ШУМА: ПСЕВДОЗВУКОВЫЕ ФЛУКТУАЦИИ ДАВЛЕНИЯ

Проблема генерации шума турбулентными потоками объектов и аппаратов, движущихся с большими скоростями в различных средах, определяет актуальность экспериментальных исследований различных статистических характеристик случайных полей гидродинамических и акустических флуктуаций в турбулентном

пограничном слое. В статье обсуждается состояние современных знаний о турбулентных источниках шума и рассматриваются методы детального количественного изучения пространственной статистической структуры пристеночных турбулентных пульсаций давления.

Проблема генерации шума турбулентными потоками первоначально возникла около 50 лет назад в связи с появившейся необходимостью изучения интенсивного шума, который производят турбулентные газовые струи при истечении из сопел реактивных двигателей самолетов. Несколько позже эта проблема получила свое дальнейшее развитие применительно к шуму многих других объектов и аппаратов, движущихся в воде и воздухе с большими скоростями. Изучением генерации турбулентного шума занимается относительно молодая наука, которую часто называют аэродинамической или гидродинамической акустикой и которая сформировалась на границе двух самостоятельных разделов механики сплошных сред: аэродинамики (гидродинамики) и акустики [1 – 5].

Аэрогидродинамическая акустика развивает и использует статистические теории различных турбулентных течений как исходный фундамент для статистического описания процессов генерации акустического излучения и формирования псевдозвуковых турбулентных давлений. Псевдозвуковые флуктуации давления имеют не акустическую, а гидродинамическую природу, чем и обусловлено их название, введенное в обращение в свое время академиком Д.И. Блохинцевым [6]. Псевдозвуковые давления не генерируют акустического излучения непосредственно, так как их волновые числа меньше звуковых волновых чисел, но они возбуждают вибрации корпусных конструкций объектов и аппаратов, обтекаемых потоком, что приводит к возникновению вторичного, шума обтекания, переизлученного вибрациями корпусных конструкций.

Проблема генерации шума турбулентными потоками считается одной из наиболее трудных проблем нелинейной механики жидких и газообразных сред. Основные трудности теоретического изучения проблемы обусловлены тем, что для ее математического описания используются сложные нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных, которые образуют незамкнутую систему (число неизвестных больше числа уравнений). Незамкнутость системы делает неизбежным привлечение опытных данных, а при экспериментальном изучении проблемы трудности состоят в необходимости измерять такие сложные статистические функции, как частотные, взаимные, частотно-волновые спектры и корреляции, которые характеризуют случайные (в вероятностном смысле) турбулентные и акустические поля и процессы. Успешно осуществить этот подход к экспериментальному изучению шумов обтекания оказалось под силу только научным центрам, имеющим современную измерительную аппаратуру, уникальное экспериментальное оборудование и высокопрофессиональные коллективы исследователей. В нашей стране малозумная аэродинамическая труба с регулируемой степенью начальной турбулентности создана в ЦНИИ имени академика А.Н. Крылова. Для подавления отражения исследуемого звука от стенок рабочего участка были разработаны специальные крупногабаритные заглушённые рабочие участки малозумной аэродинамической трубы, на стенки которых нанесены звукопоглощающие покрытия. За рубежом только в Массачусетском технологическом институте – MIT (Бостон, США) была разработана аналогичная экспериментальная установка. Однако в аэродинамической трубе MIT могут быть выполнены корректные измерения только некоторых характеристик турбулентных шумов обтекания.

Именно комплексное теоретико-экспериментальное изучение проблемы [7 – 14] позволило за прошедшие 50 лет получить удов-

летворительные решения целого ряда ее фундаментальных задач, таких, как генерация шума струйными течениями, формирование поля звуковых и псевдозвуковых давлений в плоском пограничном слое. Однако интерес к прикладным задачам борьбы с турбулентным шумом возрастает в связи с увеличением скорости движения современных транспортных средств.

Значительное количество приложений, связанных с турбулентными пульсациями давления, требуют знания параметров, характеризующих пространственно-временную структуру поля турбулентных давлений. На уровне вторых моментов такими параметрами служат пространственно-временная корреляционная функция, а также пространственный взаимный и частотно-волновой спектры турбулентных давлений [3 – 5]. Все эти характеристики формально эквивалентны друг другу, однако существующая специфика их измерений и трактовки результатов привели к тому, что экспериментальные исследования данных параметров проводились параллельно. Автором в течение последних 35 – 40 лет выполнены систематические исследования в области статистики гидродинамических и акустических флуктуаций различных турбулентных потоков [5]. В результате теоретических исследований и экспериментальных работ (в аэротрубах, опытовых бассейнах, гидролотках, на полунатурных всплывающих устройствах в условиях глубокого моря, а также на натурных морских объектах) собран громадный фактический материал о частотных, взаимных, частотно-волновых спектрах и корреляционных функциях турбулентных флуктуаций скорости и давления. Это позволило выдвинуть идеи создания методов и средств исследования гидродинамических шумов обтекания, реализованных в области нестандартных средств измерения и уникального экспериментального оборудования.

Особое внимание уделено преодолению трудностей изучения мелкомасштабной турбулентности, которые обусловлены невозможностью обеспечить идеальную пространственную фильтрацию волновых компонент случайных турбулентных полей. Эти трудности создают проблему интерпретации результатов измерений, искаженных усредняющим эффектом первичных преобразователей.

Пространственно-временная корреляционная функция R двух точек однородного поля турбулентных давлений определяется как статистическое среднее значение произведения мгновенных значений пульсационных составляющих давления в этих точках, отнесенное к интегральной интенсивности пульсаций. Очевидно, что в однородном стационарном поле данный параметр определяется вектором \mathbf{r} , соединяющим рассматриваемые точки, и временем τ_0 , разделяющим моменты регистрации давления в них, так что $R=R(\mathbf{r}, \tau_0)$. При нулевом значении параметра τ_0 параметр $R=R(\mathbf{r}, 0)$ вырождается в пространственную корреляционную функцию, равную единице при нулевом пространственном разделении и приближающимся к нулю на расстояниях, сравнимых с характерным размером вихрей, определяющих интегральный уровень турбулентных давлений.

Значительный интерес представляют продольные пространственно-временные корреляционные функции, когда вектор \mathbf{r} направлен параллельно среднему потоку, рис. 1.

Результаты, представленные на рис. 1, характеризуют поле пристеночных пульсаций давления в турбулентном пограничном слое как затухающее, конвектирующее в направлении потока. Псевдозвуковые флуктуации давления рассматриваются как поле давлений, обусловленных возникающими и затухающими, движущимися в направлении потока вихрями различного масштаба в турбулентном пограничном слое. Средняя скорость переноса вихрей (конвек-

тивная скорость) определяется отношением длины вектора r к оптимальному времени задержки (временного разделения, соответствующего максимуму корреляционной функции) и составляет 0.6 – 0.8 скорости внешнего потока.

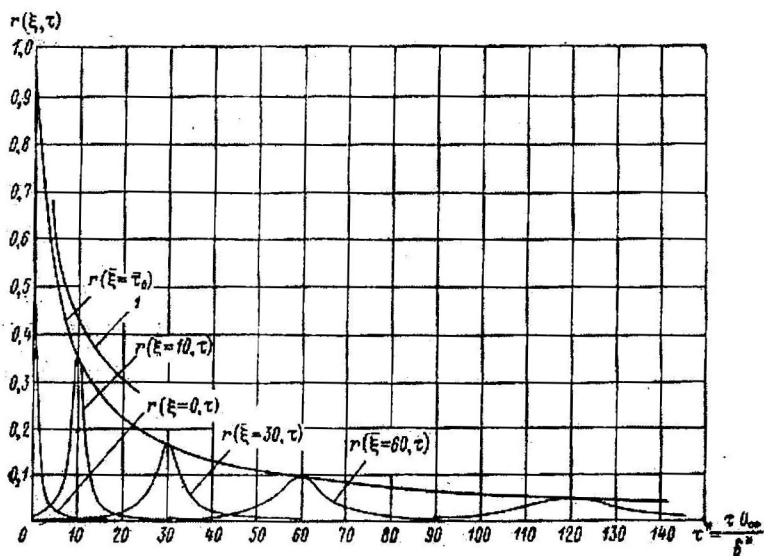


Рис. 1. Пространственно-временная корреляция пульсаций давления [5]

Взаимный спектр $\Gamma(r, \omega)$ турбулентных пульсаций давления в однородном поле на частоте ω определяется для точек, разделенных вектором r , и равен статистическому среднему произведению пульсационных составляющих давления в этих точках в достаточно узком частотном диапазоне в окрестности частоты ω , отнесенному к ширине этого диапазона. Как правило, рассматривается безразмерный нормированный взаимный спектр $\chi(r, \omega)$, определяемый как отношение $\Gamma(r, \omega)$ к значению спектральной плотности $P(\omega)$. Параметр $\Gamma(r, \omega)$ представляет собой, вообще говоря, комплексную ве-

личину. Для продольного взаимного спектра, когда вектор \mathbf{r} направлен параллельно среднему потоку, и вещественная и мнимая части взаимного спектра при фиксированном пространственном разделении являются осциллирующими затухающими функциями частоты.

Частотно-волновой спектр $E(\mathbf{\kappa}, \omega)$ турбулентных давлений представляет собой пространственное Фурье-преобразование взаимного спектра [11]. Интерес к этой характеристике вызван тем, что представления структуры поля пульсации в виде частотно-волнового спектра обеспечивают возможность наглядной интерпретации данных в виде распределения турбулентной энергии по масштабам (волновым векторам $\mathbf{\kappa}$) и фазовым скоростям [12, 13].

Процессы генерации пристеночных пульсаций давления в пограничном слое связаны с целым рядом факторов, включающих вязкость и сжимаемость движущейся среды, шероховатость стенки и градиент давления на обтекаемой поверхности. При этом даже в стандартном случае безградиентного обтекания гладкой плоской поверхности несжимаемой жидкостью при описании отдельных свойств турбулентного пограничного слоя оказывается удобным использовать различные характерные масштабы длины и скорости, соотношение между которыми определяется числом Рейнольдса. Отмеченное обстоятельство служит причиной многообразия представлений, используемых различными авторами для описания и обобщения характеристик и модельных представлений турбулентного пограничного слоя.

Существенно, что основная часть информации о влиянии физических факторов на характеристики турбулентных давлений основывается на материалах экспериментальных исследований. На рис. 2 показан аэродинамический стенд для исследования пристеночных пульсаций давления при обтекании поверхности плоской

турбулентной струей. Струя натекала на плоскую поверхность массивной поворотной плиты. Заподлицо с рабочей поверхностью плиты установлены блоки миниатюрных пьезоэлектрических преобразователей пульсационного давления [5], рис. 3.

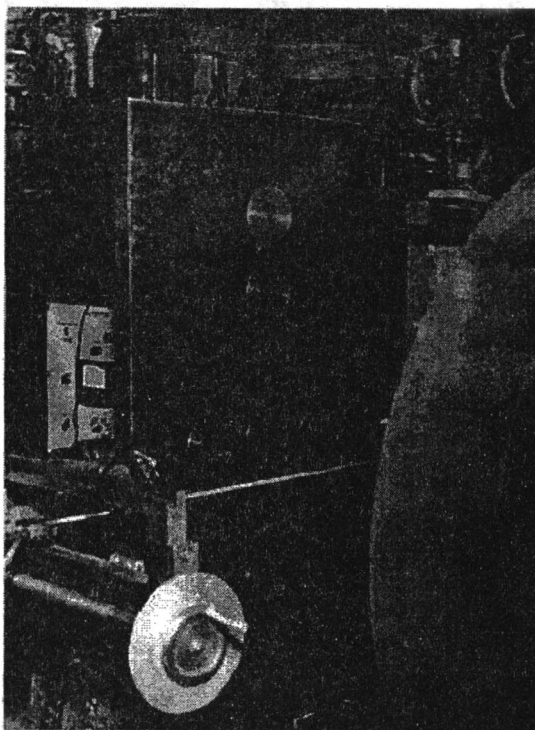


Рис. 2. Стенд для исследования турбулентных пульсаций давления

Каждый из приемников пульсаций давления, объединенных в блоки, рис. 3, имеет размер чувствительной поверхности порядка 1 мм, что существенно, т. к. размер измерительного преобразователя, усредняющего поле давлений по своей чувствительной поверхности, оказывает определяющее влияние на результаты регистрации мелкомасштабных пульсаций давления.

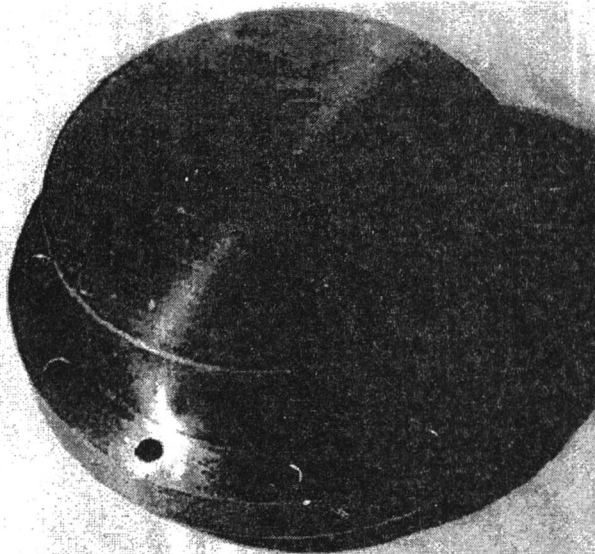


Рис. 3. Пьезоэлектрические преобразователи
пульсационного давления

Возникающая систематическая погрешность измерений пульсаций давления, обусловленная конечными размерами апертуры датчика, препятствует сопоставлению данных по спектрам, полученным различными исследователями на разных экспериментальных установках. Экспериментальные данные свидетельствуют, что интенсивность пульсаций резко возрастает при учете вклада мелко-масштабных турбулентных пульсаций давления. В связи с этим было выполнено систематическое исследование пространственной разрешающей способности приемника конечных волновых размеров при измерении частотных спектров турбулентных давлений.

Пространственная фильтрация турбулентных пульсаций давления акустическим преобразователем конечных волновых размеров приводит к систематической погрешности измерения гидродинамических шумов обтекания. Погрешность возникает из-за осреднения

турбулентных пульсаций по приемной поверхности чувствительного элемента преобразователя при некогерентном воздействии турбулентных давлений, корреляционные масштабы которых соизмеримы с геометрическими размерами приемной поверхности.

Пространственная разрешающая способность приемника турбулентных пульсаций давления [16, 17] определяется выражением

$$\gamma_T^2 = \gamma_{\text{зв}}^2 \cdot \alpha^2 \cdot \varphi(\bar{a})\varphi(\bar{c}). \quad (1)$$

При оценке погрешности измерения турбулентных пульсаций на первый план выдвигается условие, что чувствительный элемент – приемник пульсаций – должен быть меньше размера тех турбулентных вихрей, для измерения которых он предназначен. При представлении разрешающей способности в форме (1) видно, что чувствительность приемника $\gamma_{\text{зв}}^2$, полученная акустической градуировкой по звуковому давлению, не совпадает с его чувствительностью γ_T^2 к пульсациям давления. Эффект избирательности акустического преобразователя к турбулентным давлениям [15] определяется частотными характеристиками чувствительности $\varphi(\bar{a})$, $\varphi(\bar{c})$.

Погрешность измерения из-за осреднения турбулентных пульсаций для поля пристеночных турбулентных давлений является в основном функцией безразмерного параметра $\omega S^{1/2}/U_c$, образованного комбинацией частоты пульсаций ω , геометрического размера приемника $S^{1/2}$ и конвективной скорости потока U_c с поправочным коэффициентом α , который мало изменяется в конкретных условиях опыта.

С использованием представления разрешающей способности (1) в [14] автором предложен метод определения погрешности измерения спектров турбулентных давлений, учитывающий осредняющее влияние геометрических размеров апертуры приёмника. Метод ос-

нован на получении экспериментальной информации о распределениях $f(x)$ колебаний по приемной поверхности преобразователя давлений, определении эквивалентного участка приемной поверхности, взаимодействующей с пульсациями давления:

$$S_{нов} = \int_S f(\bar{x}) ds(\bar{x}). \quad (2)$$

Далее вычисляется коэффициент α использования площади приемной поверхности $\alpha = S_0 / S_{нов}$ и проводится расчет градуировочной кривой погрешности измерений по соотношениям

$$\varphi(\bar{a}) = (1/L_x^2) \int_0^{L_x} \int_0^{L_x} \exp(-a |x_0 - x'_0|) \cos b(x_0 - x'_0) f(x_0) f(x'_0) dx_0 dx'_0,$$

$$\varphi(\bar{c}) = (1/L_y^2) \int_0^{L_y} \int_0^{L_y} \exp(-c |y_0 - y'_0|) f(y_0) f(y'_0) dy_0 dy'_0.$$

Анализ разрешающей способности измерения турбулентных пульсаций давления [15] основан на корреляционной модели поля пристеночных давлений в турбулентном пограничном слое, предложенной Г. Коркосом [18]. В модели Коркоса в качестве аппроксимирующей функции используется экспоненциальная функция, зависящая только от одной безразмерной комбинации: частоты пульсаций, пространственного разделения между точками наблюдения и скорости U_c конвективного переноса потоком компонент поля. Здесь a , b – коэффициенты корреляции пульсаций давления; $|x_0 - x'_0|$, $|y_0 - y'_0|$, соответственно, – интервалы между точками наблюдения на обтекаемой поверхности по продольной координате – в направлении потока и поперечной – в ортогональном потоку направлении. L_x , L_y – геометрические размеры приемной поверхности преобразователя.

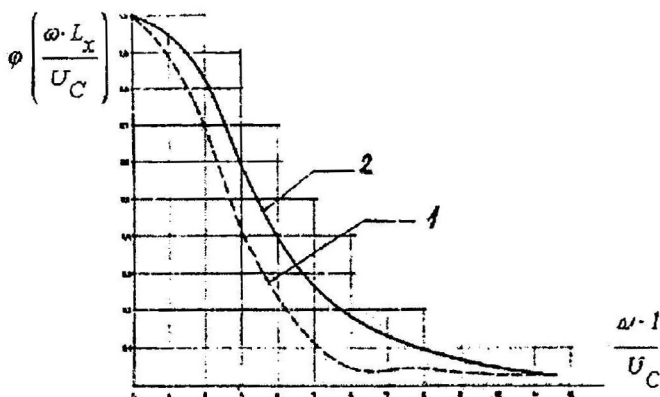


Рис. 4. Градуировочная кривая погрешности измерений пульсаций давления приемником конечных размеров;

- 1 – приемник на изгибных колебаниях;
- 2 – приемник на продольных колебаниях

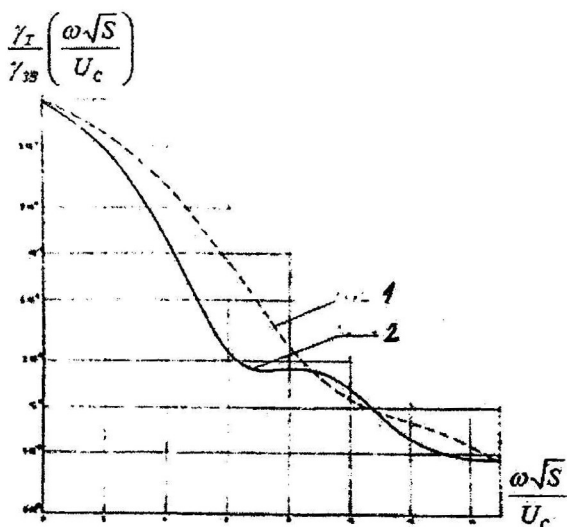


Рис. 5. Чувствительность к пульсациям давления приемника с квадратной апертурой; 1 – изгибный преобразователь, 2 – поршневой преобразователь

Подробно исследование пространственной разрешающей способности приемника, представленное на рисунках 4 и 5, обсуждается в работах [16, 17]. Были выполнены систематические экспериментальные исследования разрешающей способности и шумов обтекания в море на всплывающем устройстве [14, 15]. Измерения частотных спектров турбулентных пульсаций давления на поверхности всплывающего устройства, выполненные миниатюрными и протяженными приемниками (рисунки 6 и 7), позволили изучить зависимость регистрируемых частотных спектров от геометрических размеров чувствительной поверхности приемника давления.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Возникновение погрешности измерения гидродинамических шумов обтекания определяется пространственным разрешением акустическим преобразователем псевдозвуковых турбулентных пульсаций давления. Размеры апертуры и ориентация акустического преобразователя в турбулентном потоке значительно влияют на регистрацию гидродинамических шумов обтекания. Исследование разрешающей способности преобразователей пристеночных турбулентных пульсаций является актуальной проблемой и представляет одну из самых важных и интересных задач гидродинамической акустики.

2. Проведение экспериментальных измерений статистических характеристик пульсаций давления на обтекаемой поверхности позволяет решать задачи диагностики пространственно-временной структуры поля турбулентных давлений на поверхности обтекаемых тел с практическим выходом на проблему прогнозирования и управления уровнями турбулентных шумов обтекания современных скоростных транспортных средств.

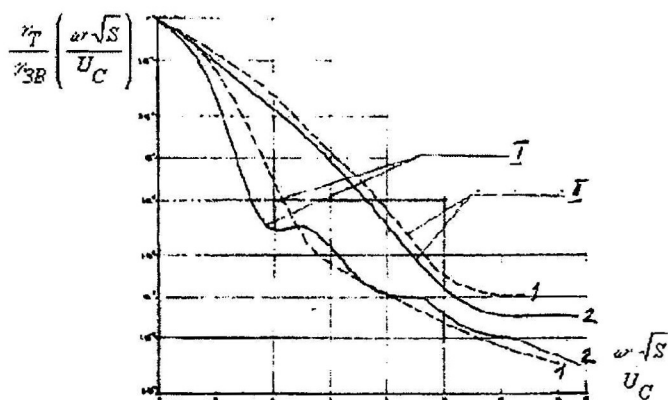
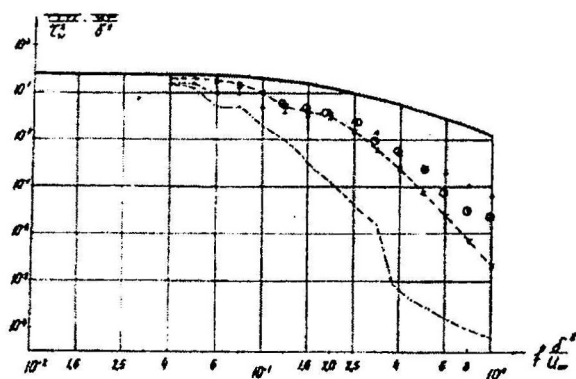


Рис. 6. Влияние ориентации апертуры приемника на измерение шумов обтекания; I – преобразователь ориентирован длинной стороной приемной поверхности вдоль потока; II – ориентирован поперек потока; 1 – приемник на изгибных колебаниях; 2 – приемник на продольных колебаниях; соотношение сторон приемной поверхности $m = 3$



Приёмник $\varnothing 20\text{мм}$

• — • — • — Без учёта погрешности
• • • Откорректированный спектр

Приёмник $\varnothing 3\text{мм}$

x — x — x — Без учёта погрешности
• • • Откорректированный спектр

— Экстраполированная спектральная плотность турбулентного давления (Докучаев и Блюдзе, 1967)

Рис. 7. Влияние размеров апертуры приемника на измерение шумов обтекания

3. Предложен метод прогнозирования и снижения уровней аэрогидродинамических шумов турбулентного пограничного слоя при движении транспортных средств с большой скоростью, основанный на изучении структуры аэрогидродинамических источников турбулентного шума.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bull M.K. *Wall-pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers: some reflections of forty years of research* // J. Sound and Vibration. – 1996. – V. 190. – No 3. – P. 299-315.

2. Власов В.Е., Гиневский А.С., Ефимцов Б.М., Кузнецов В.М., Мунин А.Г., Самохин В.Ф., Смольяков А.В., Соболев А.Ф. *Основные проблемы аэроакустики* // Труды ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского. – 1996. – Вып. 2614. – 56 с.

3. Blake W.K. *Mechanics of flow-induced sound and vibration, V. I – II*. – New York: Academic Pres., 1986. – 974 p.

4. Смольяков А.В. *Шум турбулентных потоков*. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2005.

5. Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р. *Турбулентные пристеночные пульсации давления*. – М.: Научный мир, 2008.

6. Блохинцев Д.И. *Акустика неоднородной движущейся среды*. – М.: Наука, Физматлит, 1981.

7. Смольяков А.В., Ткаченко В.М. *Измерение турбулентных пульсаций*. – Л.: Энергия, 1980.

8. Кудашев Е.Б. *Подавление акустических шумов, действующих в экспериментальной установке при измерении пристеночных пульсаций давления* // Акустич. журн. – 2003. – Т. 49. – № 5. – С. 644-655.

9. Wilmarth W.W. *Pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers* // Annu. Rev. Fluid Mech. – 1975. – V. 7. – P. 13-38.

10. Кудашев Е.Б. *Регистрация пристеночных пульсаций давления при воздействии вибраций, возбуждаемых турбулентным потоком* // Акустич. журн. – 2003. – Т. 49. – № 3. – С. 215-223.
11. Кудашев Е.Б. *Пространственная фильтрация пристеночных турбулентных пульсаций давления* // Акустич. журнал. – 2007. – Т. 53. – № 5. – С. 715-723.
12. Кудашев Е.Б. *Прямые измерения частотно-волнового спектра турбулентных пульсаций давления* // В кн.: Актуальные аспекты физико-механических исследований. Акустика и волны. Под ред. В.В. Мелешко и В.Н. Олейник. – Киев: Наукова Думка, 2007. – С. 182-191.
13. Kudashev E.B. *Spatial filtering of wall pressure fluctuations. Methods of direct measurements of wave number-frequency spectra* // Acoustical Physics. – 2008. – V. 54. – No 1. – P. 101.
14. Кудашев Е.Б. *Экспериментальные исследования шумов обтекания на всплывающем устройстве* // Акустич. журнал. – 2005. – Т. 51. – № 4. – С. 488-499.
15. Haddle G., Skudrzyk E. *The physics of flow noise* // J. Acoust. Soc. Amer. – 1969. – V. 46. – P.130-157.
16. Кудашев Е.Б. *Избирательность акустического приемника в турбулентном потоке* // Инженерно-физический журнал. – 1969. – Т. 17. – № 3. – С. 416-422.
17. Кудашев Е.Б., Попов А.И. *Разрешающая способность приемников турбулентных пульсаций скорости и давления в турбулентном потоке* // Метрология. – 1971. – № 7. – С. 51-57.
18. Corcos G.M. *On the resolution of pressure in turbulence* // J. Acoust. Soc. Amer. – 1963. – V. 35. – P. 192-157.
19. Блюдзе Ю.Г., Докучаев О.Н. *Измерения пульсаций скорости и давления в турбулентных пограничных слоях* // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1969. – № 5. – С. 175-182.